

*Sonderdruck aus der »Siemens-Zeitschrift«  
39. Jahrgang · August 1965 · Heft 8 · Seite 912 bis 916  
Verfasser: M. Witzorke*

Das menschliche Ohr kann Schalldruckunterschiede im Bereich von etwa  $1:10^6$  verarbeiten. Die natürlichen Schallereignisse, soweit sie von der Nachrichtentechnik übertragen und gespeichert werden, liegen im allgemeinen im Lautstärkebereich zwischen 30 und 120 phn. Die Dynamik, d. h. das Verhältnis der größten zur kleinsten Schalldruckamplitude, beträgt also 90 dB oder  $1:3 \times 10^4$ .

Die übertragbare oder speicherbare Dynamik wird allerdings in der Nachrichtentechnik durch das Verhältnis der Aussteuerungsgrenze zur Störspannung bestimmt. Übertragungskanäle dürfen deshalb nur den Dynamikumfang zugeführt bekommen, den sie ohne Informationsverfälschung, Nachrichtenspeicher einen solchen, den sie ohne Schaden zu leiden verarbeiten können. Dazu ist eine fachgerechte Bedienung der Übertragungseinrichtungen durch geschultes Personal erforderlich. Es wurde deshalb schon lange gefordert, die Tonregie durch geeignete elektronische Einrichtungen zu unterstützen, und zwar durch sogenannte Begrenzer oder Kompressoren, die eine weitgehend trägheitslose automatische Verstärkungsregelung bewirken [1].

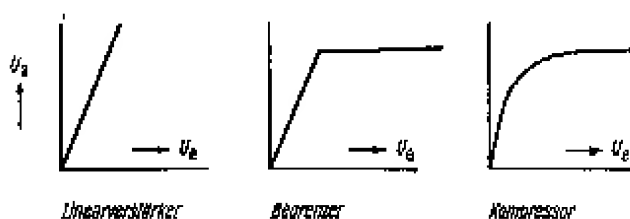


Bild 1 Aussteuerungskennlinien für Linearverstärker, Begrenzer und Kompressor

Bisher arbeiten diese Geräte meist mit Regelröhren. Daneben wurden aber auch in Röhrengeräten schon Begrenzerschaltungen mit Halbleiterdioden benutzt. Mit den heute zur Verfügung stehenden Transistoren ist es möglich geworden, derartige Verstärker in reiner Halbleiterschaltung aufzubauen [2].

#### Verstärkungsregelung durch Begrenzer und Kompressoren

Wird die Ausgangsspannung eines Verstärkers in Abhängigkeit von der Eingangsspannung aufgetragen, so erhält man als Kennlinie eine Gerade, deren Neigung der normalerweise konstanten Verstärkung entspricht. Steigt dagegen von einer bestimmten Eingangsspannung ab die Ausgangsspannung nicht weiter an, so spricht man von einem Amplitudenbegrenzer oder Begrenzerverstärker. Die Ausgangsspannung wird auf einen Höchstwert begrenzt.

In Bild 1 sind eine lineare Aussteuerungskennlinie, die Kennlinie eines Begrenzers und die eines Kompressors dargestellt. Während der Begrenzer durch eine geknickte Kennlinie gekennzeichnet ist und unterhalb einer bestimmten Eingangsspannung als Linearverstärker arbeitet, wird beim Kompressor eine allmähliche Verstärkungsänderung angestrebt. Die Kennlinie verläuft nach einem linearen Anfangsbereich stetig gekrümmt, geht allerdings mit weiter steigender Eingangsspannung auch in eine Begrenzercharakteristik über [3]. Daneben wird, wenn ein Gerät auf die beiden Betriebsarten mit »Begrenzer- und Kompressorcharakteristik« umschaltbar ist, dem Kompressorbetrieb meist eine geringe Grundverstärkung von

z.B. 10 dB zugeordnet, wogegen Begrenzerverstärker im Studioeinsatz keine Zusatzverstärkung haben sollen. Sie können dann wahlweise an beliebigen Stellen einer Regieeinrichtung eingesetzt werden, ohne das Pegeldiagramm zu verändern.

Grundsätzlich haben Begrenzer und Kompressoren Regel- oder Steuerschaltungen. Die Verstärkung wird durch eine Stelleinrichtung beeinflusst, die von der Signalspannung gesteuert wird. Dabei kann die Signalspannung für die Steuerung am Eingang des Verstärkers oder am Ausgang abgegriffen werden. Bild 2 zeigt die grundsätzliche Schaltung. Man spricht von Vorwärtsregelung, wenn die steuernde Signalspannung am Eingang abgenommen wird, wobei streng genommen keine Regelung, sondern eine Steuerung vorliegt. Anders bei der Rückwärtsregelung, bei der die Signalspannung dem Ausgang entnommen wird. Hier ist eine Regelung gegeben.

Im Übersteuerungsbereich, wenn die Begrenzerfunktion eingesetzt hat, ist die Ausgangsspannung weitgehend unabhängig von der Eingangsspannung. Dadurch entsteht als Nebenwirkung des Begrenzervorganges eine gewisse Linearisierung des Frequenzganges. Subjektiv wird dies allerdings kaum merkbar sein, wenn die Zeitkonstanten des Regelvorgangs richtig gewählt, d. h. dem Frequenz- und Amplitudenspektrum des Schallereignisses und dessen zeitlichem Tempo angepaßt sind.

Wird jedoch ein Begrenzer vor frequenzmodulierten Sendern eingesetzt, so muß dafür gesorgt werden, daß die dabei übliche Vorentzerrung, nämlich ein Anheben der hohen Frequenzen, richtig zur Wirkung kommt. Dazu wird im Begrenzer der Regelvorgang bei hohen Frequenzen früher ausgelöst, d. h. schon bei kleineren Eingangsamplituden. Mit steigender Frequenz fällt dann die Ausgangsspannung ab, und zusammen mit der vor der Sendestufe liegenden Höhenanhebung wird die Hubgrenze des Senders für alle Frequenzen voll ausgenutzt.

### Begrenzerschaltungen mit Dioden

Bekanntlich können Gleichrichter und Dioden mit gekrümmten Strom-Spannungs-Kennlinien als veränderbare Wechselstromwiderstände eingesetzt werden. Bild 3 zeigt eine Diodenkennlinie, die im Bereich A einen hohen und nahezu konstanten Wechselstromwiderstand hat. Der Krümmungsbereich B wird in Begrenzerschaltungen ausgenutzt. Im eigentlichen Durchlaßbereich C ist der Widerstand niedrig und ändert sich nur sehr wenig. Dieser Bereich wird zur Gleichrichtung ausgenutzt.

Wird nun im Bereich B durch einen Gleichstrom ein Arbeitspunkt gewählt, der durch Gleichstromänderung verschoben werden kann, so erhält man für kleine Wechselstromamplituden in der Nähe des Arbeitspunktes einen veränderlichen Wechselstromwiderstand.

Grundsätzlich entstehen bei der Durchsteuerung einer gekrümmten Kennlinie Verzerrungen. Die Wechselstromamplitude muß deshalb so klein gewählt werden, daß diese in vertretbaren Grenzen bleibt.

Die Gleichspannung zum Steuern der Diode muß von der Signalwechselspannung getrennt werden, z. B. durch eine Brückenschaltung aus je zwei Dioden und Kondensatoren, wie sie Bild 4 zeigt. Zusammen mit dem Widerstand  $R$  stellt diese Diodenbrücke einen steuerbaren Spannungsteiler dar. Mit einer solchen Schaltung läßt sich eine Spannungsteilung bis zu etwa 1:100 erreichen.

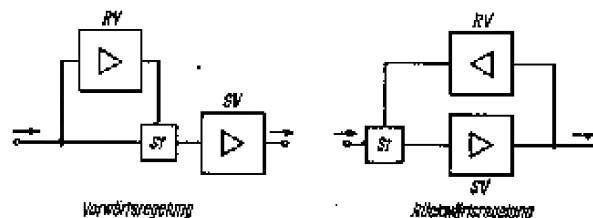


Bild 2 Prinzip der Vorwärts- und Rückwärtsregelung mit Stelleinrichtung SV, Signalverstärker SV und Regelverstärker RV

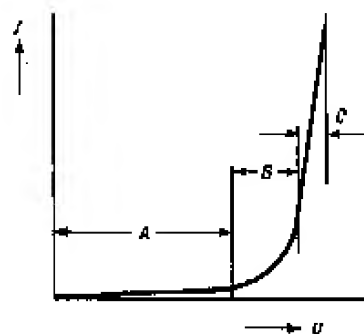


Bild 3 Diodenkennlinie (schematisch)

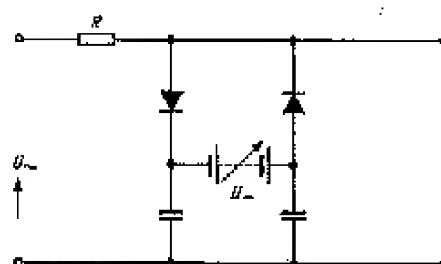
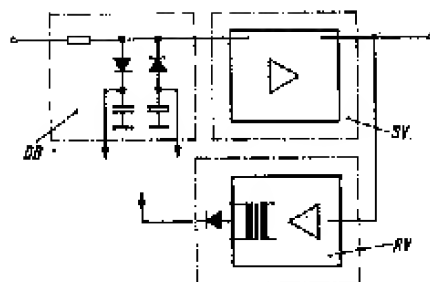


Bild 4 Diodenbrücke als gesteuerter Wechselstromwiderstand



SV Signalverstärker  
RV Regelverstärker  
DB Diodenbrücke

Bild 5 Blockschaltplan des Begrenzer-Kompressor-Verstärkers

was allerdings in ausgeführten Begrenzerschaltungen kaum ausgenutzt werden kann.

### Dimensionierungsfragen

Die an der Diodenbrücke entstehenden Verzerrungen bleiben im zulässigen Rahmen, wenn die Signalspannung etwa 10 bis 50 mV beträgt. In den Rundfunk- und Fernsehstudios ist dagegen ein Pegel von +6 dB = 1,55 V gebräuchlich, der dem Begrenzereingang zugeführt wird. Die Eingangsspannung muß deshalb zunächst gedämpft und anschließend so verstärkt werden, daß die Ausgangsspannung wieder 1,55 V beträgt. Diese Nachverstärkung verschlechtert den Störabstand, der also mit den Verzerrungen indirekt verknüpft ist. Eine Lösung geht davon aus, daß ein Störabstand von etwa 70 dB als ausreichend angesehen werden kann. Dies läßt sich erreichen, wenn die Eingangsspannung an den Dioden zum Beispiel 25 mV beträgt, ein Wert, der bei der Wahl geeigneter Dioden nur sehr geringe Verzerrungen ergibt.

Der Einsatz von Begrenzern und Kompressoren soll vom Hörer möglichst nicht wahrgenommen werden können. Das hierfür geeignete Zeitverhalten ist durch die Einschwing- und Abklingzeit bestimmt. Leitet ein lautes Signal den Begrenzervorgang ein, so müssen zunächst die Kondensatoren der Diodenbrücke aufgeladen werden. Erst dann kann ein Strom durch die Dioden fließen und den Regelvorgang auslösen. Da auch das menschliche Ohr eine gewisse Einschwingzeit braucht, ehe eine Lautstärkeänderung wahrgenommen wird, genügt es, für den Begrenzer eine kürzere Einschwingzeit zu fordern als sie das Ohr hat. Deshalb werden Einschwingzeiten unter einer Millisekunde angestrebt und erreicht.

Die Abklingzeit, d.h. die Zeit zwischen dem Aufhören der Übersteuerung und der Wiederherstellung des ursprünglichen Verstärkungsgrades, soll dagegen wesentlich größer sein. Den für das Ohr gefundenen Abkling-

zeiten von 50 bis 150 ms stehen die größeren Zeiten mancher Instrumente gegenüber. Je nach Signalinhalt und Einsatzzweck ist deshalb eine optimale Abklingzeit subjektiv bedingt. Im Beispiel wurde eine Einstellmöglichkeit im Bereich zwischen 0,5 und 1,5 s vorgesehen.

### Regelprinzip

Für den Begrenzer-Kompressor-Verstärker wurde die Rückwärtsregelung gewählt, da eine Vorwärtsregelung einen höheren Schaltungsaufwand bedingen würde. Die mögliche Rückkopplungsgefahr in rückwärtsregulierten Schaltungen kann bei nicht zu hoher Verstärkung beherrscht werden. Daneben läßt sich die Regelkurve besser stabilisieren, was besonders bei der starken Temperaturabhängigkeit der Halbleiterschaltungen wichtig und vorteilhaft ist.

Der Verstärker besteht aus den Funktionsgruppen Signalverstärker, Regelverstärker und Diodenbrücke (Bild 5).

Der Signalverstärker hat sechs Transistorstufen mit einer Gegentakt-A-Endstufe. Er ist ausschließlich mit Silizium-Planartransistoren bestückt. Eingang und Ausgang sind erdfrei. Eine starke Gegenkopplung und besondere Schaltungsmaßnahmen ergeben die für den Studiobetrieb geforderten Eigenschaften.

Vom Ausgang des Signalverstärkers wird die Eingangsspannung für den Regelverstärker abgezweigt. Ein Spannungsteiler, dessen Widerstand durch einen Kondensator überbrückt werden kann, läßt dabei das Einschalten der Vorentzerrung für den Einsatz in frequenzmodulierten Sendern zu. Die vier Stufen des Regelverstärkers sind ebenfalls mit Siliziumtransistoren bestückt. Die Endstufe arbeitet im Gegentakt-B-Betrieb. Eine starke Gegenkopplung sorgt für den gewünschten niedrigen Innenwiderstand.

Dem Ausgang des Regelverstärkers folgt ein Siliziumgleichrichter in Brückenschaltung. Beim Betrieb als Kompressorverstärker wird die Gleichspannung nun unmittelbar der Diodenbrücke zugeführt. In der Betriebsart Begrenzer soll dagegen erst kurz vor Erreichen der Nennausgangsspannung der Regelvorgang eingeleitet werden. Dazu ist es notwendig, die Gleichspannung am Ausgang des Regelverstärkers erst von einem bestimmten Wert ab der Diodenbrücke zuzuführen. Dies wird durch eine Zenerdiode erreicht, die zwischen Gleichrichter und Diodenbrücke liegt. Sie wird bei Kompressorbetrieb durch einen Schalter überbrückt.

### Diodenbrücke

Bild 6 zeigt den Schaltplan der Diodenbrücke. Die Besonderheit der hier verwendeten Diodenkombination liegt in der Reihenschaltung je einer Germanium- und einer Siliziumdiode je Zweig. Grunddämpfung, Ver-

verzerrungen und Temperaturverhalten sind dabei besonders günstig.

Trägt man die Strom-Spannungs-Kennlinie eines Diodenzweiges im doppeltlogarithmischen Koordinatensystem auf, so erhält man annähernd eine Gerade. Aus ihr läßt sich in bekannter Weise eine Exponentialfunktion ableiten, die im Bereich zwischen 2 und 500  $\mu\text{A}$  den gemessenen Kurvenverlauf mit einer Ungenauigkeit von weniger als 5% angibt. Für die in Bild 7 dargestellte Kennlinie gilt allgemein

$$U_D = C I_D^{\alpha} \quad \text{oder auch} \quad I_D = C' U_D^{\alpha'}$$

wobei  $\alpha' = 1/\alpha$  und  $C' = C^{-\alpha}$  ist.

$$\text{Ferner ist } R = \frac{dU_D}{dI_D} = C\alpha I^{(\alpha-1)}$$

Ein Mittelwert aus mehreren gemessenen Diodenpaaren ergab für eine Temperatur von 25°C folgende Ersatzfunktion

$$U_D = 308 \cdot I^{0,16} \quad (\text{mV}, \mu\text{A})$$

$$\text{oder} \quad I_D = 2,85 \cdot 10^{-16} \cdot U^{6,25} \quad (\mu\text{A}, \text{mV})$$

$$\text{und} \quad R = 48,3 \cdot I^{-0,84} \quad (\text{k}\Omega, \mu\text{A})$$

Ist die Ersatzfunktion der verwendeten Dioden einmal bekannt, so lassen sich alle weiteren Werte, wie Regelkurve, Verzerrungen und Diodenströme, leicht berechnen. Wird die Eingangsspannung des Verstärkers zum Beispiel um den Faktor  $6 \pm 16$  dB erhöht, so muß die Regelung offenbar eine Spannungsteilung der gleichen Größe bewirken, damit die Ausgangsspannung annähernd konstant bleibt. Ein geringer Anstieg der Ausgangsspannung wird allerdings dadurch verursacht, daß über den Dioden jetzt die Regelspannung steht, die für den genannten Übersteuerungsgrad etwa 1,1 V beträgt. Andererseits setzt die Regel Funktion der Dioden erst bei deren Schleusenspannung von etwa 0,4 V ein, so daß für den relativen Anstieg der Ausgangsspannung  $u_A$  und damit eine hinreichende Darstellung der Regelkurve der Zusammenhang gilt:

$$\Delta u_A \approx \frac{u_D - 0,4}{u_Z}$$

wobei  $u_D$  die Spannung über den Dioden, 0,4 V die Schleusenspannung und  $u_Z$  die Spannung über der Zenerdiode ist. Die Änderung der Ausgangsspannung  $u_A$  beträgt also bei einer 10-V-Zenerdiode etwa 7%, was 0,6 dB entspricht.

Die Verzerrungen können anhand der Kennliniendaten nach einem von KLEIN [5] angegebenen Verfahren berechnet werden. Es genügt dabei, die Amplitudenschritte für nur eine Halbwelle zu betrachten, da die Brückenschaltung symmetrisch ist. Aus dem gleichen Grund sind auch geradzählige Oberwellen nicht zu er-

warten, außer bei größeren Abweichungen der Kennlinien der beiden Diodenzweige. Bezeichnet man nach [5] den Ruhestrom als  $i_0$ , die Ströme bei den Spitzenspannungen als  $i_1$  und  $i_4$ , bei den halben Spitzenwerten als  $i_2$  und  $i_3$ , so ist  $i_1 = -i_4$  und  $i_2 = -i_3$ . Dann sind die

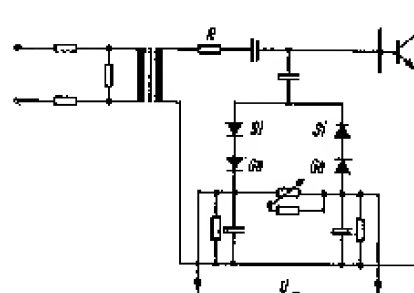


Bild 6 Schaltplan der Diodenbrücke

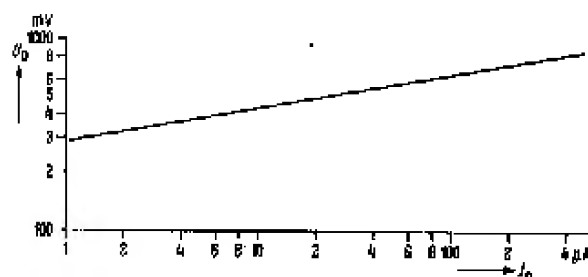
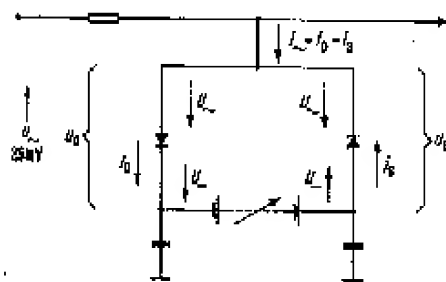


Bild 7 Kennlinie eines Diodenzweiges nach Bild 6



	$-\pi/4$	$-\pi/4$	0	$\pi/4$	$\pi/4$	
$u_D$			500	517,5	535	mV
$i_D$			20,7	25,6	31,4	$\mu\text{A}$
$u_Z$			500	482,5	465	mV
$i_Z$			20,7	16,4	13,1	$\mu\text{A}$
$i_{\infty} = i_D - i_Z$	-18,3	-9,2	0	9,2	18,3	$\mu\text{A}$
<hr/>						
	$i_1$	$i_2$	$i_3$	$i_4$	$i_5$	
	$i_1 = 18,33 \mu\text{A}; i_2 = 0; i_3 = 0,033 \mu\text{A}$					
	$K = 0,18\%$					

Bild 8 Berechnung des Klirrfaktors für eine gegebene Aussteuerung der Diodenbrücke bei bekannter Diodenkennlinie

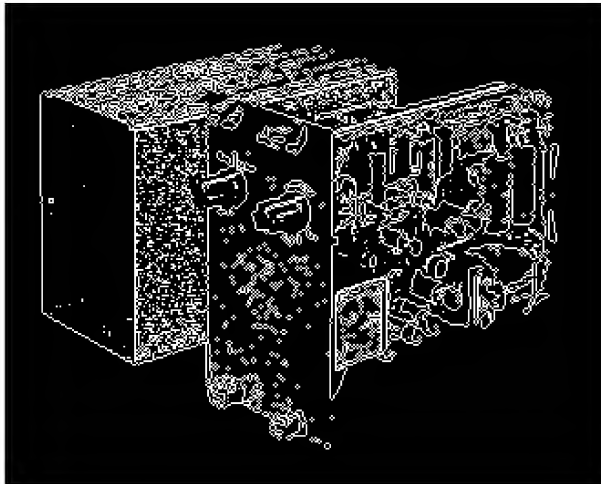


Bild 9 Begrenzer-Kompressor-Verstärker in Kassettenebauweise

Amplituden der Grundwelle  $I_1$  und der zweiten Oberwelle  $I_2$

$$I_1 = \frac{(i_3 + i_4) - (i_1 + i_2)}{3}$$

und

$$I_2 = \frac{i_3 - i_2}{3} - \frac{i_4 - i_1}{6}$$

der Klirrfaktor ist  $K = \frac{I_2}{I_1} 100 (\%)$

Ein Zahlenbeispiel ist in Bild 8 ausgeführt. Die Signalspannung an der Diodenbrücke beträgt 25 mV, die Gleichspannung 1 V. Das entspricht etwa einer vierfachen Übersteuerung. In Bild 8 bezeichnen  $u_D$  und  $i_D$  Spannungen und Ströme an dem in Durchlaßrichtung,  $u_S$  und  $i_S$  Spannungen und Ströme an dem in Sperrrichtung liegenden Diodenzweig und  $i_L$  den Signalstrom gegen 0 V, der als Differenz der Ströme in den Diodenzweigen entsteht. Die Berechnung der Verzerrungen ist hier nur für die Komponente ausgeführt, die durch die Kennlinienkrümmung der Dioden entsteht. Bei tieferen Frequenzen ist die regelnde Gleichspannung an den Dioden nicht ideal geglättet. Die Restwelligkeit überlagert sich dem Signalstrom und führt zu einer Erhöhung des Klirrfaktors. Bei kürzerer Abklingzeit ist infolge der schnelleren Kondensatorentladung die Welligkeit am größten. Im vorliegenden Gerät wird jedoch auch bei einer Abklingzeit von 0,5 s ein Klirrfaktor von 1,5 % bei 40 Hz nicht überschritten [6].

Ein einwandfreies Arbeiten der Diodenbrücke setzt voraus, daß die Dioden, Kondensatoren und Widerstände paarig abgeglichen sind. Ein Stellwiderstand zwischen den Diodenzweigen gleicht die letzten Differenzen aus.

\* Eingetragenes Warenzeichen

Derartige Abgleichmöglichkeiten und Paargleichheiten sind für Brückenschaltungen fast immer unerlässlich und auch in Röhrenbegrenzern nötig.

#### Konstruktive Ausführung und technische Daten

Der Begrenzer-Kompressor-Verstärker ist als Einschubkassette mit 80 mm Frontplattenbreite ausgeführt (Bild 9). Die beiden Leiterplatten sind mit den Lötseiten einander zugekehrt, so daß alle Bauteile und Meßpunkte gut zugänglich sind.

Zur Anzeige der Übersteuerung (Gleichspannung an der Diodenbrücke) wird ein Meßinstrument mitgeliefert. Der Verstärker gehört zur Reihe der STRAL\*-Tonstudiogeräte [7, 8].

Eingangswiderstand	10 kΩ
Ausgangswiderstand	30 Ω
Abschlußwiderstand	300 Ω
Frequenzbereich	40 Hz bis 15 kHz
Störabstand, bezogen auf die Nennausgangsspannung von 1,55 V, gemessen mit Geräuschspannungs- messer J 78	70 dB
Klirrfaktoren, vor Regeleinsatz	
40 Hz bis 15 kHz	0,5 %
im Regelbereich 40 Hz	1,0 %
1 bis 15 kHz	0,5 %
Begrenzer-Ansprechzeit	etwa 0,5 ms
Kompressor-Ansprechzeit	etwa 1,0 ms
Abklingzeit	0,5 bis 1,5 s
Stromaufnahme	
bei 24 V Gleichspannung	50 mA
Abmessungen	160 mm × 100 mm × 80 mm
Maximal zulässige Umgebungstemperatur	60 °C

#### Schrifttum

- [1] Mangold, H.: Ein neuer Begrenzungsverstärker. Rohde & Schwarz Mitteilungen (1953) 183 bis 191
- [2] Charvat, K.: Ein transistorbestückter Dynamikbegrenzer. Technische Berichte WSW (Wiener Schwachstrom Werke) (1964) 40 bis 44
- [3] DIN 45 568, Entwurf Sept. 1964.
- [4] Lawrence, J.R.: An improved method of audio level control for broadcasting and recording. J.SMPTE, Aug. 1964 661 bis 663
- [5] Rint, C.: Handbuch für Hochfrequenz- und Elektro-Techniker. Band I, 306 bis 307. Berlin: Verlag f. Radio-, Foto- und Kameratechnik
- [6] Burkowicz, P. und Pezhke, H.: Ein neues Steuerungsprinzip für Dynamikkompressoren und Pegelbegrenzer. Intern. Elektronische Rundschau. 1 (1965) 27 bis 29
- [7] Schmidt, H.: Eine verbesserte Gerätereihe in STRAL-Technik für Tonstudioanlagen. Siemens-Z. 39 (1965) 373 bis 375
- [8] Schmidt, H.: Ein neues Gerätesystem in Transistortechnik für Tonstudioanlagen. Kameratechnik 4 (1965) 74 bis 79